

# 各向均匀与单向冻结条件下饱和岩石冻胀变形特性对比试验研究

夏才初<sup>1,2</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 吕志涛<sup>1,2</sup>, 王岳嵩<sup>1,2</sup>, 黄曼<sup>1,3</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

**摘要:** 寒区隧道围岩的冻结是沿隧道径向的单向冻结, 而不是常规岩石冻胀试验中的各向均匀冻结。为研究岩石在不同冻结条件下的冻胀变形规律, 进而证实寒区隧道围岩单向冻结条件下具有不均匀冻胀性, 分别进行封闭条件下饱和砂岩各向均匀和单向冻结时冻胀特性的对比试验。其中单向冻结试验利用自行设计的装置成功地进行。试验表明, 封闭条件下饱和砂岩各向均匀冻结时, 冻胀变形各向相等, 变形过程可以划分为冷缩、冻胀、稳定 3 个阶段; 而单向冻结时, 沿冻结方向冻胀应变明显大于垂直冻结方向冻胀变形, 且沿冻结方向冻胀应变变化过程也不同于垂直冻结方向冻胀应变, 垂直冻结方向变形过程仍为冷缩、冻胀、稳定 3 个阶段, 而沿冻结方向变形过程表现为冷缩、快速冻胀、冻胀量降低、稳定 4 个阶段, 岩石表现出明显的不均匀冻胀性。试验测得饱和砂岩在 0.7~2.2 °C/cm 温度梯度下的冻结不均匀冻胀系数在 2.20~2.71 范围。在试验的温度梯度范围内, 不均匀冻胀系数与平均温度梯度呈线性关系, 温度梯度越大, 不均匀冻胀系数越大。为考虑围岩不均匀冻胀性的寒区隧道围岩冻胀力计算中不均匀冻胀系数的取值提供了试验依据, 从而可合理地计算寒区隧道围岩冻胀力。

**关键词:** 岩石力学; 各向均匀冻结; 单向冻结; 冻胀变形; 不均匀冻胀

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)02 - 0274 - 08

## Comparative experimental study on frost deformation characteristics of saturated rock under uniform freezing and uni-directional freezing conditions

XIA Caichu<sup>1,2</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, LYU Zhitao<sup>1,2</sup>, WANG Yuesong<sup>1,2</sup>, HUANG Man<sup>1,3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

**Abstract:** The freezing process of rock surrounding tunnels in cold regions is uni-directional along the radius, which is different from the uniform freezing in normal frost heave experiments of rock. A series of freezing experiments on saturated sandstone under uniform freezing and uni-directional freezing conditions were thus conducted in a closed system respectively. The test results show that the frost heave of saturated sandstone is uniform in different directions under uniform freezing condition, and that the variation process can be divided into three stages: a thermal contraction stage, a frost heave stage and a stable stage. However, under uni-directional freezing condition, the frost heave parallel to the freezing direction is much larger than that perpendicular to the freezing condition. Moreover, the variation process of the frost heave perpendicular to the freezing direction can

**收稿日期:** 2017 - 03 - 28; **修回日期:** 2017 - 07 - 20

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41472248)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 41472248)

**作者简介:** 夏才初(1963 -), 男, 1992 年于中南大学资源开发工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学、隧道与地下建筑工程方面的教学与研究工作。E-mail: tjxiacsb@126.com。通讯作者: 吕志涛(1990 -), 男, 现为博士研究生。E-mail: lvzhitao90@126.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0289

still be divided into three stages as above. However, in the variation process of the frost heave parallel to the freezing direction, four stages are observed: a thermal contraction stage, a frost heave stage, a frost heave declining stage and a stable stage. The non-uniform frost heaving coefficient is in the range of 2.20 to 2.71 when the temperature gradient is in the range of 0.7 to 2.2 °C/cm and the non-uniform frost heaving coefficient has the linear relationship with the temperature gradient. The greater the temperature gradient is, the greater the non-uniform frost heaving coefficient is.

**Key words:** rock mechanics; uniform freezing; uni-directional freezing; frost deformation; non-uniform frost heave

## 1 引言

寒区隧道含水围岩冻结后膨胀, 会对衬砌产生冻胀力作用。冻胀力作用下衬砌混凝土开裂是寒区隧道冻害的主要原因之一<sup>[1]</sup>。因此, 寒区隧道设计需计算冻胀力<sup>[2]</sup>, 而围岩冻胀变形特性及冻胀量是计算衬砌所受冻胀力的重要基础<sup>[3]</sup>。

Y. Lai 等<sup>[4]</sup>提出了寒区隧道冻胀力计算的围岩冻融圈整体冻胀模型, 认为作用于衬砌的冻胀力为冻融圈冻结后整体冻胀导致; 在冻胀力解的推导过程中, Y. Lai 等<sup>[4]</sup>假设围岩冻结圈各向均匀冻胀。目前, 关于岩石冻胀变形的试验研究也都是按各向均匀冻结条件进行的。各向均匀冻结条件即岩石试件各表面温度相等, 岩石冻结过程中, 沿各方向的温度梯度相等。陶履彬<sup>[5]</sup>对红砂岩、辉绿岩等 8 种岩石进行了封闭条件下各向均匀冻结时的冻胀试验, 总结了不同岩石冻胀变形与温度、饱和度的经验关系。N. Matsuoka<sup>[6]</sup>测试了各向均匀冻结条件下凝灰岩、安山岩、页岩等的冻胀率。康永水等<sup>[7]</sup>测试了花岗岩、白砂岩、砂质泥岩在干燥、饱和状态下各向均匀冻结时的冻胀变形, 给出了冻胀变形与孔隙率、饱和度、冻结率以及冰和岩石骨架体积模量的经验关系式。此外, M. Mellor<sup>[8]</sup>依据水结冰体积膨胀 9%, 提出封闭条件下饱和岩石冻胀率的理论计算公式  $9\%n$  ( $n$  为岩石孔隙率)。夏才初等<sup>[9]</sup>提出 Mellor 计算公式忽略了岩石自身对冻胀的约束作用, 并对已有试验实测冻胀率进行了统计分析<sup>[5-7]</sup>, 得到封闭条件下考虑岩石自身约束作用的饱和岩石冻胀率实测值拟合公式为  $2.17\%n$ 。

然而, 黄继辉等<sup>[10]</sup>发现 Y. Lai 等<sup>[4]</sup>按围岩各向均匀冻胀提出的冻融圈整体冻胀模型, 如果按冻结围岩的弹性模量大于未冻结围岩的弹性模量的正常情况计算, 则衬砌与冻结围岩趋于脱离, 无法计算出作用于衬砌上的冻胀力。实际上, 寒区隧道贯通后, 冷空气进入, 隧道内空气温度较低, 而围岩深

部温度相对较高, 围岩沿径向存在温度梯度, 沿环向和轴向几乎无温度梯度; 因此, 围岩处于沿径向的单向冻结状态, 而不是各向均匀冻结状态<sup>[11]</sup>。受沙际德等<sup>[12]</sup>测得粉土、S. Kanie 等<sup>[13]</sup>测得黏土单向冻结时沿冻结方向的冻胀率大于垂直于冻结方向的冻胀率的启发, 黄继辉等<sup>[10]</sup>提出寒区隧道围岩在沿径向的单向冻结条件下具有各向不均匀冻胀性, 并提出了考虑围岩不均匀冻胀性的冻胀力计算方法, 对比证实了考虑围岩不均匀冻胀的解更接近工程实际。

但是目前, 岩石在单向冻结条件下会表现出不同于各向均匀冻结条件的冻胀性, 即不均匀冻胀性, 尚无文献开展相关的试验研究。

因此, 自行研制了岩石试件单向冻结时的冻胀性试验装置, 分别进行了封闭条件下饱和砂岩各向均匀冻结和单向冻结时冻胀特性的对比试验, 研究了岩石在不同冻结条件下的冻胀变形规律, 为寒区隧道围岩单向冻结条件下不均匀冻胀性提供试验支撑, 并为考虑围岩不均匀冻胀性的冻胀力计算方法中不均匀系数的取值范围提供依据。

## 2 试验方案

分别开展了封闭条件下饱和砂岩各向均匀冻结和单向冻结试验。试验所用砂岩的基本物理力学性质如表 1 所示, 加工成 80 mm×80 mm×100 mm 长方体试件。

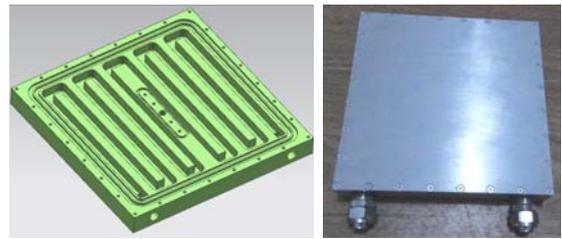
表 1 砂岩基本物理力学参数

干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙率/%	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
2.08	2.27	18.4	1.00	8.52

各向均匀冻结试验在 DW-40 低温试验箱中进行, 如图 1 所示, 每次试验过程中, 试验箱保持温度恒定, 试件各表面温度相同, 岩石各向均匀冻结。

为了进行岩石单向冻结试验, 自行研制了岩石

单向冻结试验装置，其示意图如图2所示，试件上表面与冷端板紧密接触，下表面与暖端板紧密接触，试验过程中冷、暖端板温度保持不变，试件由上向下冻结。试件侧面用隔热材料绝热。冷端板温度由XT5704-R50C 高低温恒温液浴循环两用槽控制，暖端板温度由XT5201-R50HG 低温恒温液浴循环槽控制。为提供稳定的温度边界条件，使恒温槽输出的冷热量在试样的边界面上分布均匀，本试验采用布置了恒温液通道的铝合金冷、暖端板来传递冷量，通道设计及实物照片如图3所示，其导热性能优异，且刚度较大，不易变形。恒温循环液采用汽车发动机防冻液，该防冻液冰点温度-45℃，可满足试验设定最低温-20℃要求。



(a) 恒温液通道 (b) 冷、暖端板照片

图3 冷、暖端板设计

Fig.3 The cold and warm plate

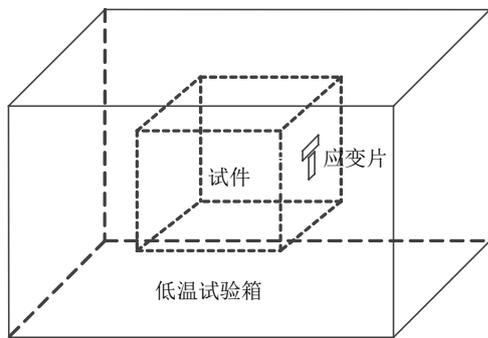


图1 各向均匀冻结试验示意图

Fig.1 Diagram of uniform freezing test

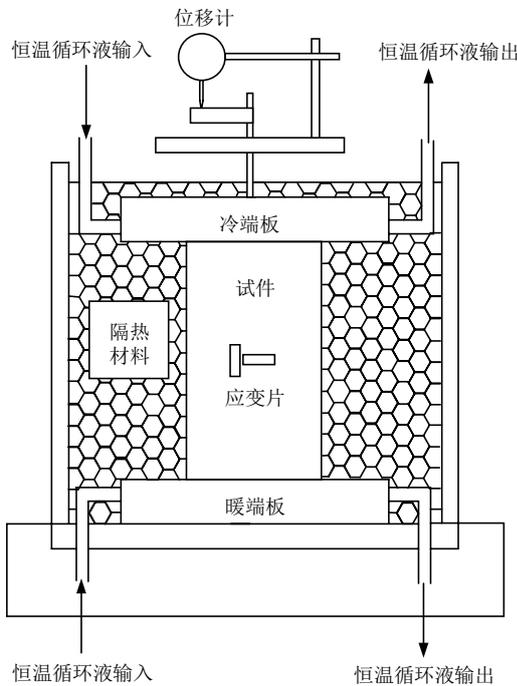


图2 自行研制的岩石单向冻结试验示意图

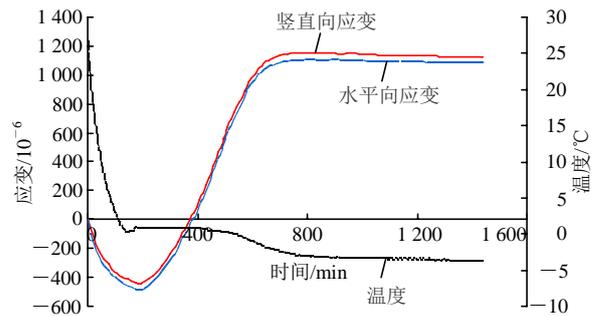
Fig.2 Diagram of uni-directional freezing test

在试件侧面中部，沿垂直方向和水平方向黏贴应变片测量冻结过程中试件变形情况；将热敏电阻

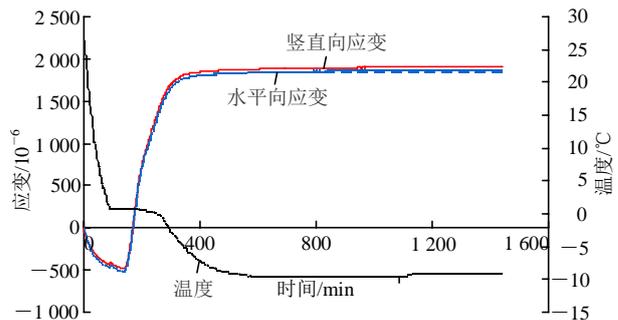
传感器插入试件内部测量温度变化情况。试验前对试件进行真空饱和，试验过程中，试件外侧包裹聚氯乙烯薄膜，防止水分蒸发。

### 3 各向均匀冻结变形规律

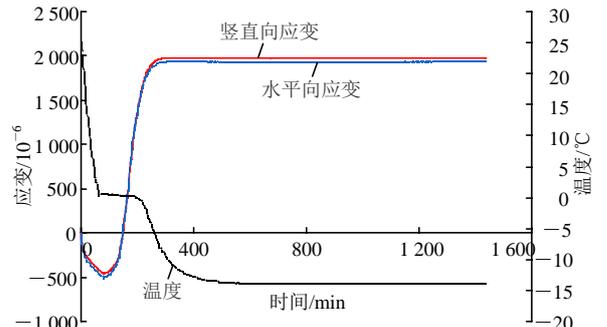
取砂岩试件12个，分成4组，每组3块，分别进行-5℃、-10℃、-15℃、-20℃各向均匀冻结试验。试验过程中应变与温度随时间变化曲线如图4所示。



(a) -5℃



(b) -10℃



(c) -15℃

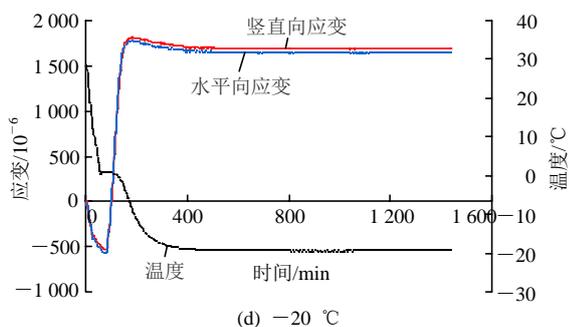


图 4 各向均匀冻结试验冻胀应变和温度随时间变化曲线  
Fig.4 Variation of frost heaving strain and temperature vary with time in uniform freezing test

### 3.1 冻胀变形规律

由图 4 可知,  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  各温度条件下, 饱和砂岩竖直向应变和水平向应变十分接近, 同一时刻竖直向与水平向应变基本相等, 说明各向均匀冻结时冻胀变形各向相等。

4 种温度条件下冻胀变形曲线, 虽然应变大小不同, 但形状类似, 基本可以划分为以下 3 个变形阶段。

**第 I 阶段(冷缩阶段):** 饱和砂岩由室温降至  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时, 应变降低, 岩石收缩, 表现出多数固体材料热胀冷缩的特性。该阶段岩石孔隙中的水分尚未达到冰点, 岩样表现为冷缩性质。

**第 II 阶段(冻胀阶段):** 温度维持在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 应变由最低点开始逐渐增大, 因水分结冰膨胀产生冻胀变形。在持续冻结过程中, 应变增长速率, 开始基本保持不变, 应变线性增长, 后来应变增长速率不断减小, 应变趋于稳定。

**第 III 阶段(稳定阶段):** 试件温度由  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右逐渐降低, 趋向设定试验温度时, 温度稳定后, 应变基本维持恒定。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下, 应变达到峰值后会略有下降后维持稳定, 这是由于温度过低时, 残余未冻水含量基本不变, 此阶段水冰相变产生的冻胀量小于冻结体的冷缩量。

### 3.2 温度变化规律

各冻结温度条件下温度随时间变化曲线如图 5 所示, 各温度变化曲线形状类似, 整个冻结试验过

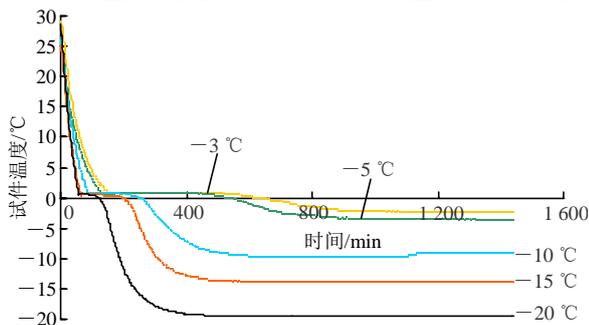


图 5 不同温度条件下试件内部温度变化曲线  
Fig.5 Time curves of internal temperature of specimen

程温度变化可划分为 4 个阶段。

**第 I 阶段(快速降温阶段):** 试件由室温条件置于低温环境后, 岩石试件释放热量, 迅速降温, 此过程中, 岩石中水分未发生冻结, 无冰晶存在。由图 5 可知, 设定的温度条件越低, 温度变化曲线斜率越大, 降温速率越快, 到达下一阶段的时间越短。

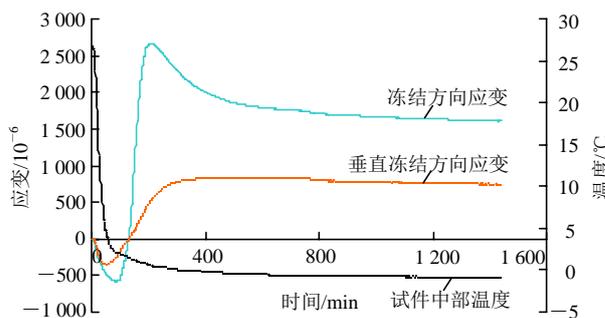
**第 II 阶段(相变恒温阶段):** 经历短暂的过冷阶段, 水分开始冻结, 形成冰晶芽和冰晶生长, 温度迅速跃变回升至冻结温度附近, 之后, 温度维持在冻结温度, 直至完全冻结, 此过程中释放的大量潜热使试件温度维持稳定, 标准状态下,  $1\text{ kg}$  冰要吸收  $79.6\text{ kCal}$  的热量才能转化为同温度的水<sup>[14]</sup>。另外, 由图 5 可知设定试验温度越低相变恒温阶段启动得越早, 且持续的时间越短。

**第 III 阶段(缓慢降温阶段):** 岩石中水分相变冻结基本完成, 或释放潜热不足, 无法维持温度稳定, 冻结体继续降温, 趋向试验设定温度, 此过程降温速率明显低于第 I 阶段。

**第 IV 阶段(稳定恒温阶段):** 试件温度经历第 III 阶段达到试验设定环境温度, 保持不变, 设定的温度条件越低, 试件温度稳定的时间越早。

## 4 单向冻结变形规律

取砂岩试件 12 个, 分成 4 组, 每组 3 块, 分别进行冷端温度  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 暖端均为  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下的单向冻结试验。试验过程中, 冷端板在上, 暖端板在下, 冻结由上向下进行, 竖直方向为冻结方向, 如图 2 所示。通过黏贴于试件中部竖直方向应变片测量冻结方向变形, 黏贴于试件中部水平方向应变片测量垂直冻结方向变形。试验结果如图 6, 7 所示。



(a) 冷端  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$

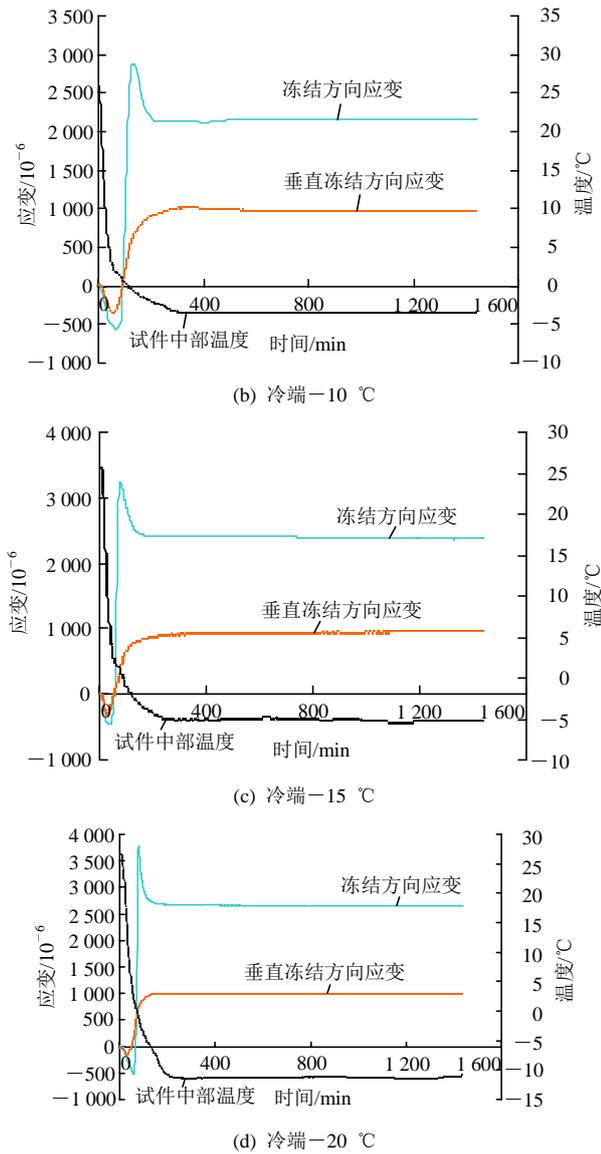
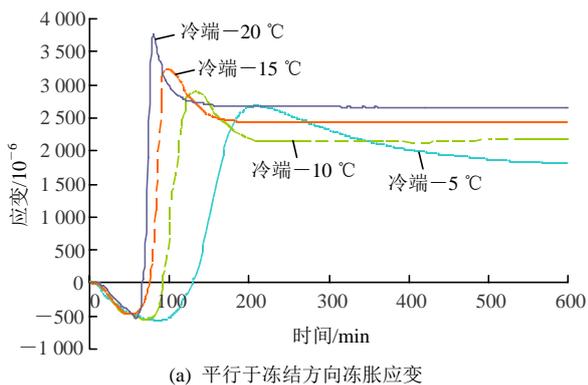


图6 单向冻结试验应变和温度随时间变化曲线

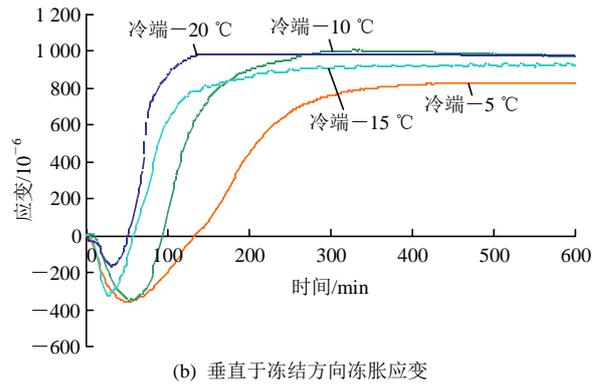
Fig.6 Variation of frost heaving strain and temperature vary with time in uni-directional freezing test

### 4.1 冻胀变形规律

由图6可以看出，在封闭条件下饱和砂岩单向冻结试验中，沿冻结方向应变与垂直冻结方向应变变化规律明显不同，且沿冻结方向的冻胀应变明显大于垂直于冻结方向应变。垂直冻结方向应变



(a) 平行于冻结方向冻胀应变



(b) 垂直于冻结方向冻胀应变

图7 单向冻结时冻胀应变变化曲线

Fig.7 Frost heaving strain in uni-directional freezing test

变化过程可分为冷缩阶段、冻胀阶段、稳定阶段，变化规律与各向均匀冻结试验中的应变变化特征相似。

单向冻结时，沿冻结方向应变变化过程可分为4个阶段：

第I阶段(冷缩阶段)：冷量由上向下传递，但岩石孔隙中水分未冻结，岩石发生冷缩变形。

第II阶段(快速冻胀阶段)：岩石试件温度进一步降低至冰点以下，试件中部分水分冻结成冰，挤压岩石骨架，使应变增长，并迅速达到峰值，表现出明显的冻胀特性。

第III阶段(冻胀量降低阶段)：在冻胀量达到峰值后，冻结方向冻胀应变又表现出一定的下降。

第IV阶段(稳定阶段)：冻胀量降低到达稳定值，并保持不变。整个试件在设定的温度条件下温度场也已到达稳定，未冻水含量不再改变，故冻胀量也不再改变。

由图7(a)可知，4种温度条件下，冷端温度越低，快速冻胀阶段冻胀速率越快，冻胀量降低阶段冻胀量下降也越快。对于最终稳定冻胀应变，冷端温度越低，稳定冻胀应变值越大。

在单向冻结条件下，水结冰时，趋向于形成长轴沿冻结方向的细长“针状”冰晶体。H. Tong等<sup>[15]</sup>在单向冻结琼脂凝胶体平行于冻结方向切片的显微图像中，R. Mousavi等<sup>[16]</sup>在单向冻结面团平行于冻结方向切面的层析图像中，均观察到了单向冻结条件下冰晶体沿冻结方向生长量明显大于垂直冻结方向生长量的现象。即冰晶体在单向冻结条件下表现出显著的不均匀变形。在温度梯度作用下，冰晶体生长出现“几何选择性”<sup>[17]</sup>的现象在湖冰微结构中也有发现。受上述自然现象启发，可以认为岩石单向冻结时，冰晶体生长具有“几何选择性”，沿冻结方向长轴增长速率大于垂直于冻结方向的短轴。即

沿冻结方向上生长速率和生长量大于垂直冻结方向, 则孔隙冰晶体对孔隙壁岩石骨架的挤压也是冻结方向强于垂直冻结方向, 使得冻胀变形表现出显著的不均匀性, 示意图如图 8 所示。由于沿冻结方向上冰晶体生长到达一定程度, 冰晶体长轴方向两尖端与岩石骨架产生剧烈挤压, 冰晶体受到较大压力, 使得冰晶体冰点降低, 产生在冰晶体尖端的小范围融化, 从而导致沿冻结方向的冻胀变形出现一定的下降量。

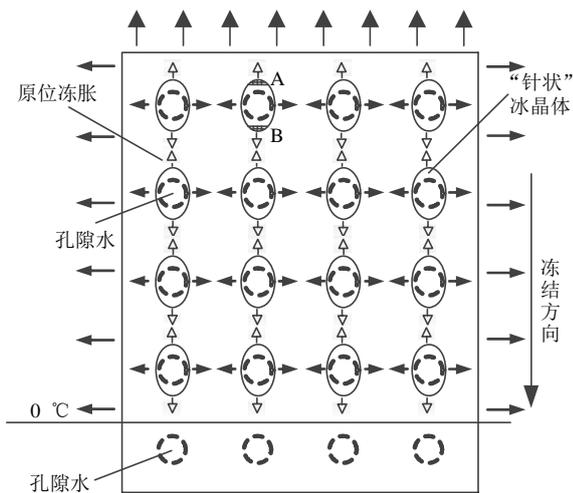


图 8 单向冻结不均匀冻胀机制示意图

Fig.8 Non-uniform frost heaving mechanism of rock under uni-directional freezing condition

而在封闭条件下饱和岩石各向均匀冻结试验中, 沿各个方向温度场变化规律相同, 水冰相变时冰晶体在各个方向的生长速率相同, 呈“球状”生长, 进而岩石试件产生的各向均匀的冻胀变形, 示意图如图 9 所示。

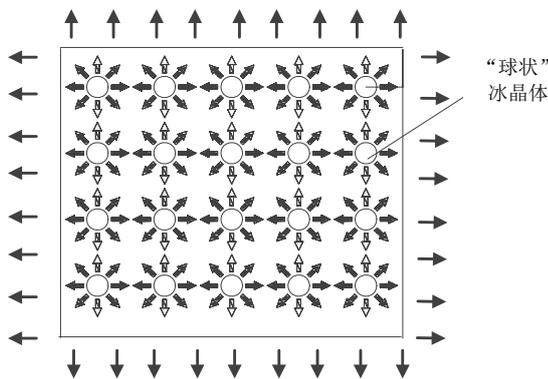


图 9 各向均匀冻胀机制示意图

Fig.9 Uniform frost heaving mechanism of rock under uniform freezing

为进一步说明, 封闭条件下饱和岩石单向冻结表现出的不均匀冻胀性, 是由于温度梯度作用下孔

隙水冻结表现出沿冻结方向与垂直冻结方向差异的结果, 取一组烘干试件进行同条件下冷端温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 暖端 $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的单向冻结试验。试验进行过程中, 同样将干燥试件用保鲜膜包裹, 再做好保温处理, 防止空气中水分冷凝进入试件, 造成误差而影响试验结果。试验过程中应变和温度变化曲线如图 10 所示。

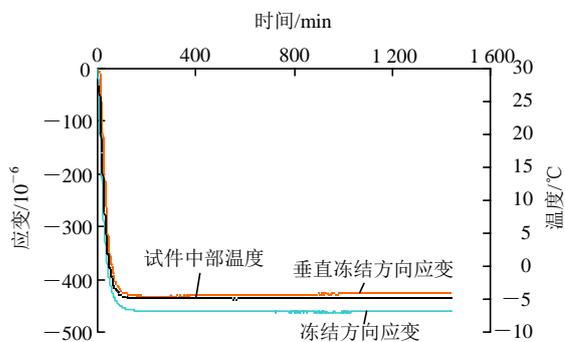


图 10 干燥砂岩冷端 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 单向冻结试验结果  
Fig.10 Freezing test results of dry sandstone under uni-directional freezing condition

对比图 10 与 6(c)可见, 同样在冷端 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的梯度温度场的作用下, 但干燥试件冻结方向应变与垂直冻结方向应变十分接近, 而且应变曲线只有 2 个阶段, 即冷缩段和稳定段, 未见饱和试件的冻结方向冻胀应变大于垂直冻结方向应变的不均匀冻胀现象。可见, 岩石试件冻胀是由于试件中的水分冻结成冰产生膨胀造成的, 且单向冻结条件下, 岩石的不均匀冻胀是孔隙水在水冰相变过程中冰晶体生长的方向性造成的。

#### 4.2 各向均匀冻结与单向冻结冻胀变形规律对比

为进一步对比说明各向均匀冻结与单向冻结条件下冻胀变形的不同, 选取各向均匀冻结试验中试验温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、单向冻结试验中冷端温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻胀变形数据绘制在同一图中, 将各向均匀冻结试验中 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试验与单向冻结试验中冷端温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻胀变形数据也绘制在同一图中, 如图 11 所示。由图 11 可见, 相同温度条件下, 单向冻结时沿冻结方向冻胀应变大于均匀冻结的冻胀应变, 单向冻结时垂直于冻结方向的冻胀应变最小。

本试验采用的砂岩为各向同性的, 在各向均匀冻结试验中, 同一测点两垂直方向(竖直与水平方向)冻胀应变相同。即各向均匀冻结条件下, 冻胀应变各向均匀。然而, 在单向冻结试验中, 沿冻结方向的冻胀应变明显大于垂直于冻结方向, 且两者的变形规律也存在明显差异。即单向冻结条件下, 冻胀

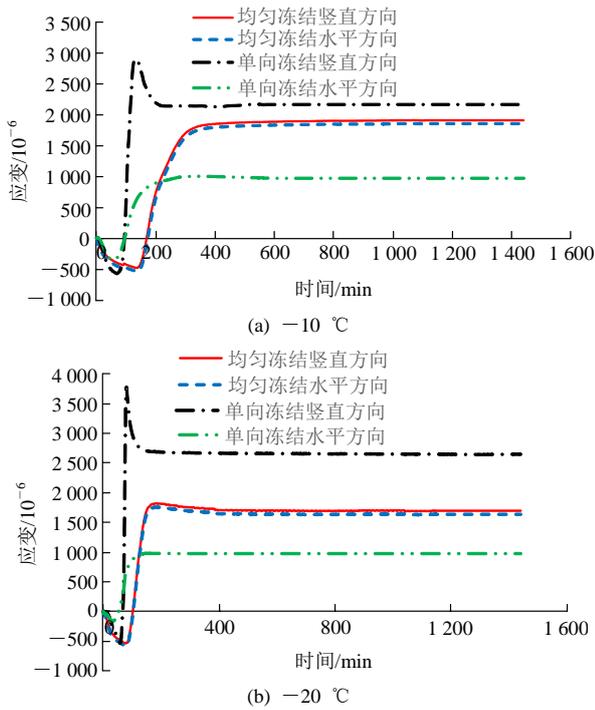


图 11 各向均匀冻结与单向冻结冻胀变形曲线对比

Fig.11 Comparison between frost heaving strain curves under uniform freezing and uni-directional freezing condition

应变各向不均匀。由此说明，寒区隧道围岩沿径向单向冻结条件下具有不均匀冻胀性。

### 4.3 不均匀冻胀系数

岩石单元体的不均匀冻胀示意图如图 12 所示，黄继辉等<sup>[10]</sup>定义岩石的不均匀冻胀系数  $k$  为

$$k = \alpha_{//} / \alpha_{\perp} \quad (3)$$

式中： $\alpha_{//}$  为冻结方向的线冻胀率， $\alpha_{\perp}$  为垂直于冻结方向的线冻胀率。显然  $k \geq 1$ 。

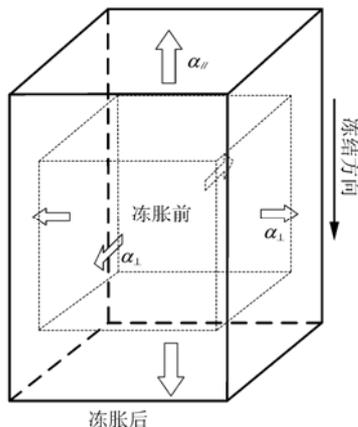


图 12 不均匀冻胀的描述

Fig.12 Non-uniform frost heave

将 4 种温度梯度条件下沿冻结方向冻胀应变稳定值即线冻胀率  $\alpha_{//}$  与垂直冻结方向冻胀应变稳定值即  $\alpha_{\perp}$  列入表 2，并按式(3)计算各温度梯度条件下

表 2 不同梯度温度条件下线冻胀率与不均匀冻胀系数

Table 2 Linear frost heaving rate and non-uniform frost heaving coefficient under different temperature gradients

平均温度梯度/ ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	冻结方向 线冻胀率 $\alpha_{//}$ /%	垂直冻结方向 线冻胀率 $\alpha_{\perp}$ /%	不均匀冻胀 系数 $k$
0.7	0.160 8	0.073 2	2.20
1.2	0.215 9	0.096 7	2.23
1.7	0.237 7	0.094 3	2.52
2.2	0.264 4	0.097 5	2.71

的不均匀冻胀系数，如表 2 所示。

将不同温度梯度条件下砂岩试件的不均匀冻胀系数与平均温度梯度关系绘制在图 13 中，可以发现，饱和砂岩在 0.7~2.2  $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  的试验温度梯度范围内，冻结不均匀冻胀系数在 2.20~2.71 范围，而且，不均匀冻胀系数与平均温度梯度呈线性关系，相关系数  $R^2 = 0.932 8$ ；温度梯度越大，不均匀冻胀系数越大。进而，依据拟合关系，可获得各温度梯度下该种砂岩饱和岩样的不均匀冻胀系数。

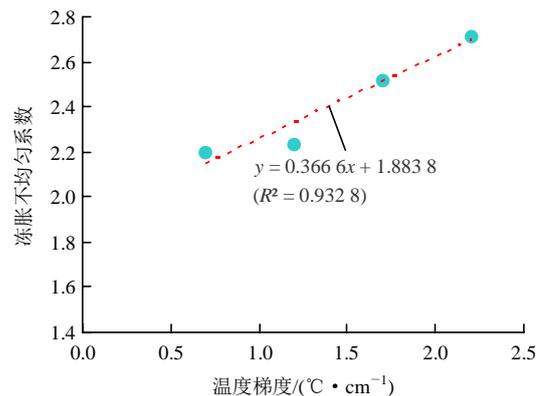


图 13 不均匀冻胀系数与平均温度梯度关系

Fig.13 Variation of non-uniform frost heaving coefficient with average gradient temperature

## 5 结 论

本文分别进行封闭条件下饱和砂岩各向均匀冻结和单向冻结时冻胀特性的对比试验，研究岩石在不同冻结条件下的冻胀变形规律，得出如下结论：

(1) 封闭条件下饱和砂岩各向均匀冻结时，冻胀变形各向相等，变形过程可以划分为冷缩、冻胀、稳定 3 个阶段。

(2) 自行研制了岩石单向冻结试验装置，开创性地进行了岩石单向冻结的成功试验，发现封闭条件下饱和砂岩单向冻结时，沿冻结方向冻胀应变明显大于垂直冻结方向冻胀变形，岩石表现出明显的

不均匀冻胀性。垂直冻结方向变形过程可划分为冷缩、冻胀和稳定 3 个阶段, 而沿冻结方向变形过程可分为冷缩、快速冻胀、冻胀量降低、稳定 4 个阶段。

(3) 在本文试验的温度梯度范围内, 不均匀冻胀系数与平均温度梯度呈线性关系, 温度梯度越大, 不均匀冻胀系数越大。试验测得: 饱和砂岩在  $0.7 \sim 2.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$  的温度梯度下冻结不均匀冻胀系数在  $2.20 \sim 2.71$  范围。

(4) 通过对比试验证实了单向冻结条件下, 饱和岩石具有不均匀冻胀性, 获得了一定温度梯度范围内围岩不均匀冻胀系数的取值范围, 为考虑围岩不均匀冻胀性的真实情况的寒区隧道围岩冻胀力计算中不均匀冻胀系数取值提供了试验依据。

### 参考文献(References):

- [1] 张俊儒, 仇文革. 昆仑山隧道冻胀力现场测试及其数据分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增 1): 564 - 568.(ZHANG Junru, QIU Wenge. In-situ test and data analysis of frost-heave force of Kunlun Mountain Tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(Supp.1): 564 - 568.(in Chinese))
- [2] 吴紫汪, 赖远明, 藏恩穆, 等. 寒区隧道工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 61 - 62.(WU Ziwan, LAI Yuanming, ZANG Enmu, et al. Cold region tunnel engineering[M]. Beijing: China Ocean Press, 2003: 61 - 62.(in Chinese))
- [3] 北川修山, 川上辉. 寒冷地区的隧道变形与围岩冻胀性[J]. 隧道译丛, 1987, (3): 14 - 34.(KITAGAWA S, KAWAKAMI Y. Deformation of tunnel and ground freezing in cold regions[J]. Translated Collection of Tunnel, 1987, (3): 14 - 34.(in Chinese))
- [4] LAI Y, WU H, WU Z, et al. Analytical viscoelastic solution for frost force in cold-region tunnels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31(3): 227 - 234.
- [5] 陶履彬. 岩石冻胀性与其含水量关系的试验研究[C]// 第一届华东岩土工程学术大会论文集. [S.l.]: [s.n.], 1990: 387 - 396.(TAO Lubing. Experimental study of the relationship between the frost heave ratio and the water content of the rock[C]// Proceedings of the First Session of the East China geotechnical Conference. [S.l.]: [s.n.] 1990: 387 - 396.(in Chinese))
- [6] MATSUOKA N. Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 253 - 270.
- [7] 康永水, 刘泉声, 赵 军, 等. 岩石冻胀变形特征及寒区隧道冻胀变形模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2 518 - 2 526. (KANG Yongshui, LIU Quansheng, ZHAO Jun, et al. Research on frost deformation characteristics of rock and simulation of tunnel frost deformation in cold region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2 518 - 2 526.(in Chinese))
- [8] MELLOR M. Phase composition of pore water in cold rocks[R]. Hanover, New Hampshire: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1970.
- [9] 夏才初, 黄继辉, 韩常领, 等. 寒区隧道岩体冻胀率的取值方法和冻胀敏感性分级[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1 876 - 1 885. (XIA Caichu, HUANG Jihui, HAN Changling, et al. Evaluation of the frost-heave ratio and classification of the frost heave susceptibility for rock mass around cold region tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1 876 - 1 885.(in Chinese))
- [10] 黄继辉, 夏才初, 韩常领, 等. 考虑围岩不均匀冻胀的寒区隧道冻胀力解析解[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增 2): 3 766 - 3 774. (HUANG Jihui, XIA Caichu, HAN Changling, et al. The analytical solution of frost heave force acting on cold-region tunnel liner considering the anisotropy frost heaving of the surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.2): 3 766 - 3 774.(in Chinese))
- [11] 黄继辉. 寒区隧道冻胀力计算理论与衬砌结构设计方法研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2015.(HUANG Jihui. Frost heave force calculation theory and lining structure design method for cold region tunnels[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2015.(in Chinese))
- [12] 沙际德, 张长庆, 王正中, 等. 粉土自由冻胀参数的试验研究[C]// 第五届全国冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1996: 1 201 - 1 207.(SHA Jide, ZHANG Changqing, WANG Zhengzhong, et al. Testing parameters of frozen soil[C]// Proceedings of the 5th Permafrost Congress of China. Beijing: Science Press, 1996: 1 201 - 1 207.(in Chinese))
- [13] KANIE S, HAO Z, MAKIMURA M, et al. A practical method for three-dimensional frost heave simulation based on Takashi's equation[C]// Cold Regions Engineering 2012. American Society of Civil Engineers. [S.l.]: [s.n.], 2012: 697 - 704.
- [14] 李 椿, 章立源, 钱尚武, 等. 热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 243 - 246.(LI Chun, ZHANG Liyuan, QIAN Shangwu, et al. Thermotics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 243 - 246.(in Chinese))
- [15] TONG H, NODA I, GRYTE C C. Formation of anisotropic ice-agar composites by directional freezing[J]. Colloid and Polymer Science, 1984, 262(7): 589 - 595.
- [16] MOUSAVI R, MIRI T, COX P W et al. A novel technique for ice crystal visualization in frozen solids using X-ray micro-computed tomography[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(7): 437 - 442.
- [17] 黄文峰. 湖冰微结构及其对热、力学参数影响的研究[博士学位论文][D]. 大连: 大连理工大学, 2013.(HUANG Wenfeng. Study on lake ice microstructure and its effects on thermal and mechanical parameters[Ph. D. Thesis][D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.(in Chinese))